

Tomografia magnetyczno-rezonansowa

Współczesna medycyna dysponuje różnorodnymi metodami diagnostycznymi. Ich opracowanie wymaga często bliskiej współpracy lekarzy, inżynierów i naukowców z wielu różnych dziedzin. Owocem tej współpracy są narzędzia, w których najnowsze technologie stosuje się m.in. do wczesnego identyfikowania chorób, badania skutków działania nowych leków lub do przeprowadzania trudnych operacji. Jedną z takich nowoczesnych metod diagnostycznych jest obrazowanie za pomocą magnetycznego rezonansu jądrowego, zwane tomografią magnetyczno-rezonansową, a potocznie – „rezonansem”.

Co to jest magnetyczny rezonans jądrowy?

Zjawisko magnetycznego rezonansu jądrowego zostało opisane po raz pierwszy przez Isidora Rabię w 1938 roku. Efekt rezonansu magnetycznego stoi u podstaw dwóch ważnych metod badawczych – spektrometrii i obrazowania magnetyczno-rezonansowego. Metody te znajdują szerokie zastosowanie zarówno w badaniach materiałowych jak również w biologii i medycynie. Wielkie znaczenie jądrowego rezonansu magnetycznego z punktu widzenia postępu nauki odzwierciedla fakt, że Szwedzka Akademia Nauk przyznała w sumie aż pięć Nagród Nobla związanych z tym efektem: dwie z fizyki (w 1944 i 1952 roku), dwie z chemii (w 1991 i 2002 roku) i jedną z medycyny (w 2003).



Laureaci Nagród Nobla przyznanych za opracowanie i udoskonalenie metod badawczych oraz zastosowania magnetycznego rezonansu jądrowego: od lewej Isidor Rabi (1944), Felix Bloch i Edward Purcell (1952), Richard Ernst (1991), Kurt Wuthrich (2002), Paul Lauterbour i Peter Mansfield (2003)

Dokładny opis metody obrazowania z użyciem magnetycznego rezonansu jądrowego wykracza znacznie poza ramy tego artykułu. Pozwolę sobie w związku z tym na pewne uproszczenia, które nakreślą ogólny zarys tej techniki obrazowania, a zainteresowanego czytelnika odsyłam do doskonałego podręcznika prof. Jacka W. Hennela i prof. Teresy Kryst-Widźgowskiej pt. *Na czym polega tomografia magnetyczno-rezonansowa? Zasada i przykłady zastosowań w medycynie* (IFJ, Kraków 1995).

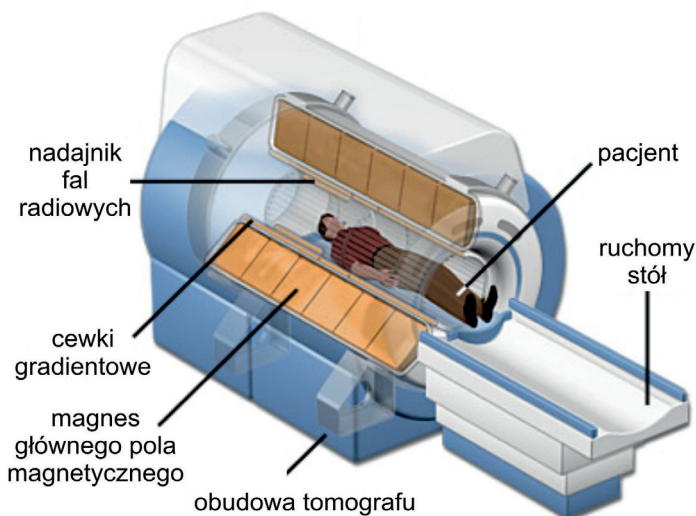
Zacznijmy od wyjaśnienia znaczenia poszczególnych słów w nazwie metody. Słowa „magnetyczny” i „jądrowy” wynikają z tego, że mamy do czynienia ze zjawiskiem, w którym istotne są magnetyczne własności jąder atomowych. Natomiast słowo „rezonans” odnosi się do efektu zachodzącego podczas wymuszonych drgań badanego układu fizycznego. Zjawisko to można zaobserwować na zwykłej huśtawce. Wytrącona z równowagi huśtawka kołysze się z charakterystyczną dla siebie *częstotliwością*, czyli liczbą drgań na sekundę. Jeśli na przykład jedno pełne wahnięcie (tam i z powrotem) zajmuje 2 s, to znaczy, że częstotliwość drgań wynosi pół drgania na sekundę. Tę częstotliwość nazywa się *częstotliwością własną*. Ze względu na siły tarcia wychylenia huśtawki stopniowo maleją, natomiast częstotliwość wahań pozostaje niemal taka sama. Po pewnym czasie drgania ustają całkowicie i huśtawka zatrzymuje się. Co można zrobić, żeby temu zapobiec? Można na przykład regularnie popychać huśtawkę. Dostarczamy w ten sposób huśtawce energii, kompensując straty wynikające z tarcia. Najlepszy efekt uzyskamy, jeśli będziemy ją popychać za każdym razem, kiedy znajduje się w punkcie największego wychylenia. Oznacza to, że będziemy działać na huśtawkę z siłą o tej samej częstotliwości, co częstotliwość własna huśtawki. Taki przypadek, kiedy częstotliwość wymuszająca i częstotliwość własna układu są idealnie dopasowane nosi nazwę rezonansu. Efekt ten zachodzi zarówno dla drgań mechanicznych, takich jak ruch huśtawki, jak również dla drgań elektromagnetycznych. W przypadku magnetycznego rezonansu jądrowego rolę huśtawki pełnią jądra atomowe wchodzące w skład naszego ciała, znajdujące się w polu magnetycznym tomografu, a rolę osoby popychającej huśtawkę – fala elektromagnetyczna o częstotliwości radiowej. Częstotliwość własna każdego jądra atomowego zależy od intensywności pola magnetycznego w danym miejscu oraz od typu jądra. Oznacza to, że jeśli w każdym miejscu w tomografie mielibyśmy inną wartość pola magnetycznego, to teoretycznie moglibyśmy tak dobrać częstotliwość wymuszającej fali elektromagnetycznej, żeby dopasować się do częstotliwości własnej każdego wybranego jądra i pobudzać je wybiórczo do drgań. W praktyce jest to możliwe nie dla pojedynczych jąder, ale dla większych ich grup, tzw. *voxeli*, czyli małych sześcianników zlokalizowanych w konkretnych miejscach w organizmie.

Jak zbudowany jest tomograf rezonansu magnetycznego?

Podstawowym elementem tomografu jest magnes wytwarzający główne pole magnetyczne, w którym musi znajdować się pacjent w trakcie badania (rys. 1).

W chwili obecnej najczęściej wykorzystuje się magnesy nadprzewodzące, mające kształt wielkiej cewki w kształcie solenoidu, chłodzonej ciekłym helem. W obudowie głównego magnesu umieszcza się również szereg dodatkowych cewek o skomplikowanych kształtach (tzw. cewek gradientowych), których celem jest zróżnicowanie pola magnetycznego od punktu do punktu tak, aby móc rejestrować drgania pochodzące od poszczególnych grup jąder atomowych znajdujących się w różnych miejscach organizmu pacjenta. Regularne włączanie i wyłączenie tych cewek powo-





Rys. 1. Schemat budowy tomografu do obrazowania magnetyczno-rezonansowego

duże dość nieprzyjemny hałas. W trosce o komfort podczas badania zakłada się więc pacjentowi słuchawki. Żeby wymusić drgania jąder atomowych używa się fali elektromagnetycznej o częstotliwości radiowej. Dlatego istotnym elementem tomografu jest także nadajnik fal radiowych wysyłający tzw. impuls częstotliwości radiowej oraz ich odbiornik, pozwalający na zarejestrowanie drgań pochodzących od jąder atomowych, czyli tzw. sygnału magnetyczno-rezonansowego. Podczas badania zbierane są sygnały z wielu voxelów, po czym sygnał ten jest analizowany komputerowo, co pozwala zrekonstruować obraz wybranych przekrojów ciała pacjenta.

Co tak naprawdę widać na obrazach magnetycznego rezonansu?

Metoda magnetycznego rezonansu jądrowego pozwala zarejestrować sygnał pochodzący od jąder atomowych posiadających tzw. moment magnetyczny. Najpopularniejszym jądrem atomowym wykorzystywanym w diagnostyce jest jądro atomu wodoru. Jądra atomów wodoru, wchodzących w skład wody, tłuszczów i innych związków chemicznych, występują w dużej ilości w organizmie, co pozwala otrzymać wystarczająco silny sygnał, a tym samym dobrą jakość obrazu. To, co widzimy na obrazkach, odzwierciedla więc w pierwszym przybliżeniu gęstość jąder wodoru w różnych miejscach w organizmie. Tam, gdzie obraz jest jasny – liczba jąder jest duża, a tam gdzie ciemny – mała. Ze względu na różną gęstość organów wewnętrznych, można dobrze określić ich położenie, wielkość, a nawet strukturę wewnętrzną w badanym organizmie. Dobrą ilustracją jest rys. 2, na którym ciemny obszar w miejscu usytuowania płuc odzwierciedla bardzo małą gęstość jąder wodoru w tym organie. Sygnał magnetyczno-rezonansowy zawiera jednak inne cenne informacje. Wróćmy na chwilę do naszej analogii z huśtawką. Wymuszenie drgań jąder atomowych za pomocą fali elektromagnetycznej odpowiada regularnemu popychaniu huśtawki. Jednak po zakończeniu impulsu drgania stopniowo słabną, podobnie jak zmniejsza się wychylenie huśtawki z pozycji równowagi. To, jak szybko

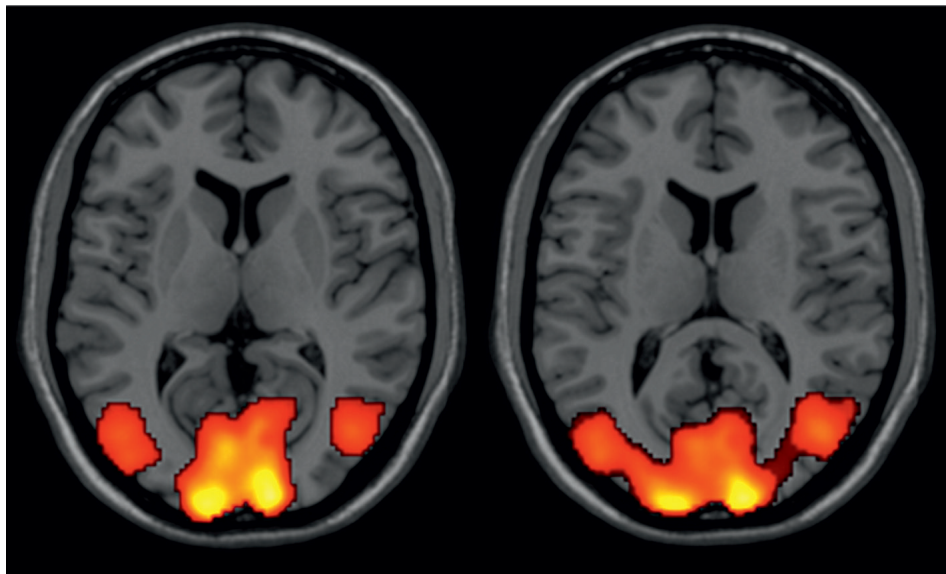


Rys. 2. Przekrój ciała uzyskany metodą obrazowania magnetyczno-rezonansowego

zanika sygnał magnetycznego rezonansu, zależy od obecności różnego rodzaju związków chemicznych w otoczeniu jąder wodoru. Jeśli na przykład związki te mają własności magnetyczne, to będą one silnie oddziaływać z badanymi jądrami i „tłumić” ich drgania, co spowoduje, że sygnał zaniknie szybciej, niż w innych miejscach. Można tak zaplanować badanie, żeby na obrazie uwidocznili różnice w długości trwania sygnału i dzięki temu skonstruować mapę położenia magnetycznej substancji „zakłócającej”. Najlepszym przykładem tego typu badania jest tzw. funkcjonalny rezonans magnetyczny, wykorzystywany w obrazowaniu mózgu. Metoda ta opiera się na różnicy we własnościach magnetycznych hemoglobiny transportującej tlen i dwutlenek węgla we krwi. Hemoglobina połączona z tlenem nie ma własności magnetycznych, natomiast hemoglobina transportująca dwutlenek węgla posiada silny moment magnetyczny. Jeśli jakiś region w mózgu jest bardzo aktywny, to jego zapotrzebowanie na tlen gwałtownie rośnie. Silnie natleniona krew kierowana jest do tych intensywnie pracujących obszarów, co oznacza, że ilość natlenionej, niemagnetycznej hemoglobiny, jest w tych miejscach większa niż w sąsiadujących częściach mózgu. W porównaniu z otaczającymi obszarami region silnie natleniony będzie więc na obrazach funkcjonalnych widoczny jako jaśniejszy, ponieważ sygnał magnetycznego rezonansu będzie w tych miejscach trwał nieco dłużej. Dzięki tej metodzie możliwe jest m.in. nieinwazyjne badanie różnych funkcji neurologicznych. Ilustracją powyższego zjawiska jest rys. 3, na którym wyróżniono obszary mózgu o zwiększonej aktywności w czasie stymulacji.

Kiedy stosuje się obrazowanie magnetyczno-rezonansowe?

Magnetyczny rezonans jądrowy nie wiąże się z narażeniem organizmu na promieniowanie jonizujące i dlatego badania można wielokrotnie powtarzać. Metoda ta nadaje się do obrazowania tzw. tkanek miękkich, szczególnie do diagnostyki nowotworów, niektórych schorzeń mózgu, takich jak stwardnienie rozsiane oraz w przypadku konieczności wykonania badania w czasie ciąży.



Rys. 3. Obraz mózgu uzyskany metodą obrazowania funkcjonalnego. Kolorem pomarańczowym oznaczono te obszary, które były najbardziej aktywne w czasie badania

KC